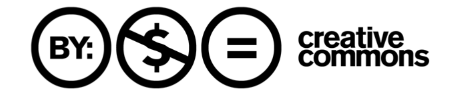


Syria

A propos du trilithon de Baalbek. Le transport et la mise en oeuvre des mégalithes

Jean-Pierre Adam



À PROPOS DU TRILITHON DE BAALBEK

Le transport et la mise en œuvre des mégalithes [1]

PAR

Jean-Pierre ADAM

(Pl. I-II)

Le sentiment immédiat et ineffaçable s'imprimant dans l'esprit du visiteur de Baalbek, est la stupeur devant le mégalithisme du matériau architectural mis en œuvre pour la construction de cet ensemble monumental. C'est plus particulièrement devant le gigantesque podium entourant le temple de Jupiter Héliopolitain, que l'on recherche les superlatifs les plus puissants, superlatifs encore faibles lorsque l'on contemple la colossale « Hajar el qoublé [2] » demeurée dans sa carrière, incomplètement détachée de la souche rocheuse, témoin inachevé du défi lancé à la technique monumentale par les bâtisseurs de Baalbek.

Le problème soulevé par le transport des pierres géantes de ce site libanais a trop longtemps suscité des propositions relevant de la plus haute fantaisie, pour qu'on ne laisse plus longtemps dans le doute une énigme

[1] Cette étude a été facilitée par la collaboration de Mlle Marie-Geneviève Froidevaux, responsable d'une partie des relevés et des photographies faites sur place et auteur de plusieurs planches. En outre j'ai bénéficié de renseignements techniques sur le site, communiqués par M. Pierre Coupel, responsable de nombreuses restaurations à Baalbek, tant sur le temple de Jupiter que sur le temple « de Bacchus » ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma vive reconnaissance.

[2] La « pierre du Sud ».

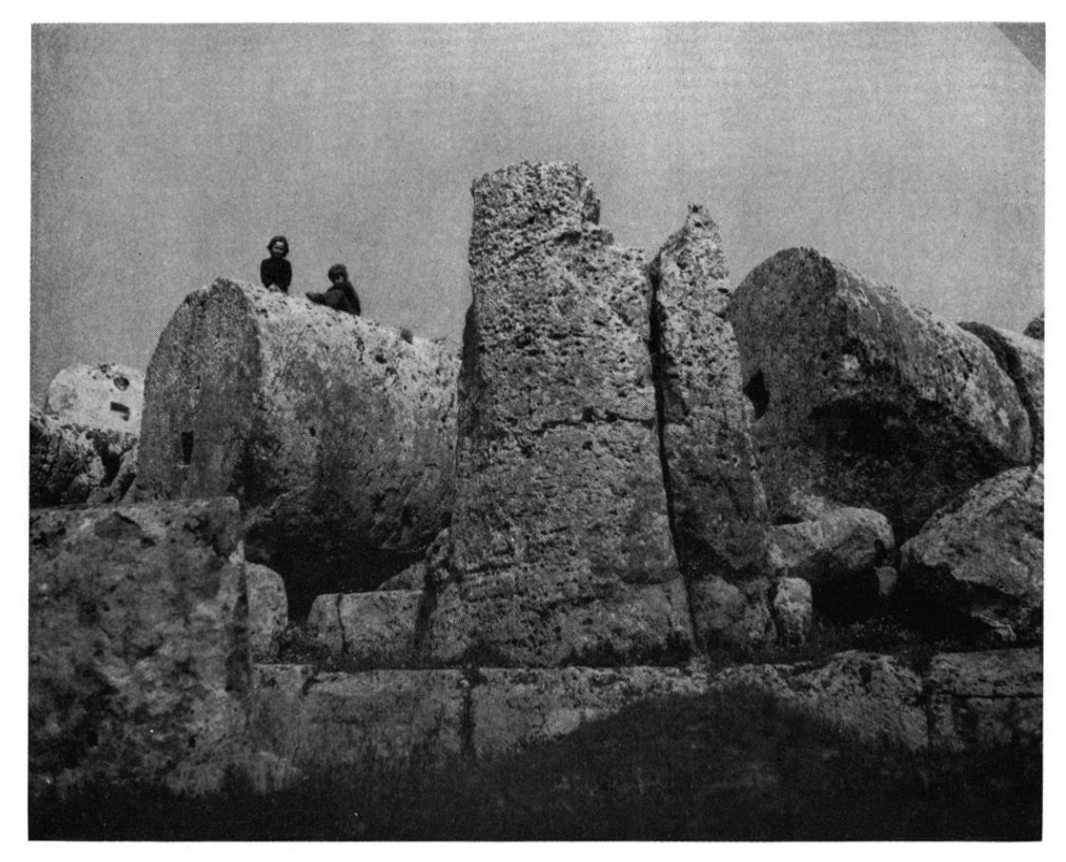


Fig. 1. — Sélinonte, temple G, la colonnade Sud (*Photo J. P. Adam*).

archéologique qui trouve sa réponse dans la connaissance que l'on a des moyens dont disposaient les constructeurs de l'Antiquité.

Il convient donc, avant d'aborder le cas précis et exceptionnel de Baalbek, de faire état rapidement des procédés et machines connus dans le monde méditerranéen aux époques classiques. Nous n'aborderons pas ici en effet, le mégalithisme de la vallée du Nil, dont l'importance et la spécificité nous éloigneraient trop du sujet traité.

La Grèce, pays de la maîtrise géométrique, connut pourtant la démesure monumentale, et c'est parmi ses temples hors d'échelle que l'on puise l'enseignement le plus précis sur les techniques de mise en œuvre des pierres de grand appareil. Le Temple G à Sélinonte [1] (fig. 1), le temple

[1] Outre ses dimensions inusitées (110,12 × 50,07 mètres) ce temple d'attribution inconnue, commencé vers 520 et achevé vers 470 av. J.-C. a reçu deux types de colonnes. Celles de l'époque archaïque ont des tambours de base d'un diamètre de 2,95 m et d'une hauteur de 3,44 m,

dit « des géants » à Agrigente, tous deux en Sicile, le célèbre Artémision d'Éphèse, et le sanctuaire d'Apollon à Didymes font partie de cette famille de géants, tant par leurs dimensions générales (tous quatre ont une longueur supérieure à 110 m et des colonnes avoisinant 18 m en hauteur) que par le volume des pierres assemblées pour les bâtir [1]. Le mégalithisme se constate également dans certains temples du VIe siècle dont les colonnes sont volontiers taillées dans un seul bloc de pierre, ainsi qu'on peut le vérifier aux Apollonion de Syracuse et de Corinthe.

Cette recherche de l'exploit est aisément compréhensible pour l'époque archaïque : l'architecture durant le VIe siècle se pétrifie totalement, renouvelant un phénomène qui s'était déjà produit huit siècles auparavant lorsque la pierre avait été mise en œuvre avec tant de hardiesse pour les rois de Mycènes, pour être ensuite délaissée durant de longues générations, comme si la Grèce, épuisée par l'énormité de cet effort et déçue de n'avoir donné le jour qu'à des citadelles formidables, méditait un art nouveau.

C'est avec la même vanité que les Grecs entreprendront les immenses sanctuaires des colonies lointaines, preuves à leurs propres yeux, de leur volonté de conquête définitive autant que manifestation de puissance incomparable aux yeux des populations indigènes [2].

Fort heureusement, les Grecs se sont lassés de la massivité sans grâce des titans archaïques et limitèrent à quelques unités les sanctuaires coloniaux de prestige (en Asie mineure notamment). Dès le premier quart du Ve siècle, l'harmonie de la composition, recherche poussée parfois jusqu'à la sophistication, devient le souci permanent des architectes. Étonnant message que celui laissé par le bâtisseur formé dans la discipline pythagoricienne, aux témoins attentifs qui sauront au cours des siècles, apprécier derrière l'austérité des façades doriques, la finesse d'une épure et l'extrême sensibilité des corrections optiques allant jusqu'à l'abolition de la ligne droite.

leur poids est de 56 tonnes. Les colonnes du Ve siècle sont plus massives encore avec des tambours d'un diamètre atteignant 3,50 m, une hauteur de 2,85 et un poids de 64 tonnes.

(1) Il faudrait encore citer l'Héraion de Samos détruit vers 538 et reconstruit aussitôt par Polycrate (cf. O. REUTHER « Der Heratempel von Samos », 1957) et l'Olympieion d'Athènes (abandonné en 510).

(2) Le temple des géants à Agrigente, élevé après la grande victoire d'Himère sur les Carthaginois en 480 av. J.-C., avait par surcroît un caractère triomphal au superlatif.

La technique y trouve son compte ; jamais grand appareil ne fut plus intimement assemblé que sur l'Acropole d'Athènes où pourtant la pierre demeure impressionnante [1], mais l'exploit n'y est plus vanité ou empirisme, il est devenu science des accords.

Mégalithisme archaïque ou perfection classique, la technique de l'architecture grecque nous est bien familière, tant grâce aux signes visibles sur les monuments eux-mêmes, qu'aux témoignages écrits. Des comptes multiples fournissent des listes et inventaires de matériaux, leur provenance et leur mode d'utilisation [2], mais un seul ouvrage théorique nous est parvenu complet, il s'agit bien sûr des « Dix Livres d'Architecture » de Vitruve.

L'intérêt de cette unique publication est encore accru par le fait que, bien qu'écrit durant le règne d'Auguste, ce traité fait un large appel à l'Art de bâtir des Grecs dont l'auteur cite les ouvrages perdus, de théoriciens et architectes les plus célèbres [3].

Dans le contexte de cette brève étude, notre intérêt va au livre dixième de Vitruve, où l'on trouve une description minutieuse des procédés de bardage et des machines utilisés sur les chantiers grecs et romains et dont l'auteur mentionne tout à la fois la grande efficacité et la généralisation d'emploi. Le transport des mégalithes n'y est pas oublié, et c'est par lui que nous allons commencer l'illustration de cet exposé [4].

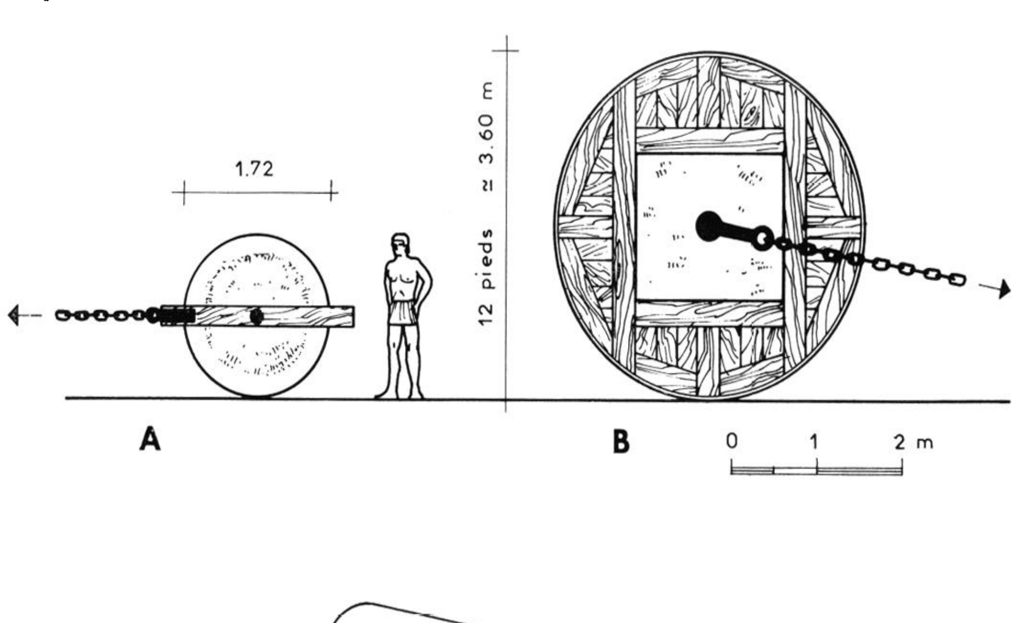
Vitruve cite deux anecdotes ayant trait à la construction de l'Artémision d'Éphèse, faisant état des ingénieux procédés auxquels eurent recours les architectes pour assurer le déplacement de très gros éléments destinés à l'ordre du temple : L'architecte Ctésiphon « ...ayant à amener les fûts de » ces colonnes depuis les carrières où l'on les prenait jusqu'à Éphèse, et » n'osant pas employer les charrettes comme moyen de transport, parce que

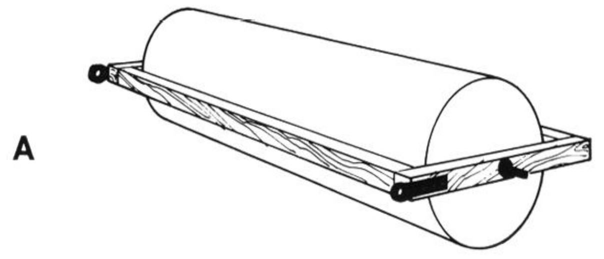
(1) Les architraves de marbre de l'ordre intérieur des propylées ont une longueur de 6,30 m, pèsent 9.000 kg et ont été posées sur les colonnes ioniques à plus de 10 m de hauteur.

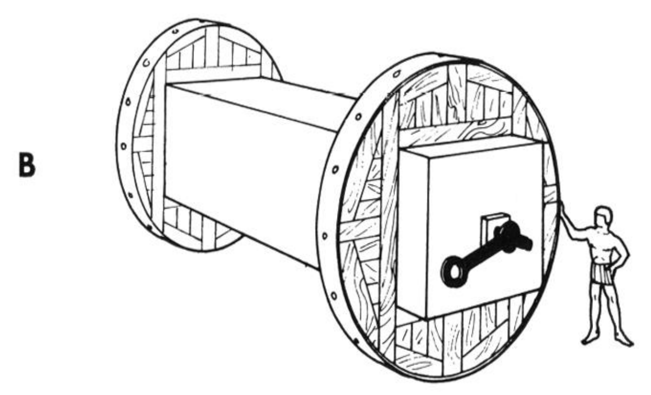
(2) Nous renvoyons aux multiples documents fournis par les auteurs de manuels d'Architecture antique : — Y. Garlan « Recherches de poliorcétique grecque », Paris 1974. — R. Martin, « Manuel d'Architecture grecque », Paris 1965. — A. Orlandos, « Les matériaux de construction des anciens grecs ». 2 T., Paris 1968.

(3) Vitruve, Préface du livre VII.

(4) Malheureusement l'illustration originale de Vitruve n'a pas été reproduite par les copistes médiévaux, aussi se réfère-t-on le plus généralement aux interprétations de Perrault.



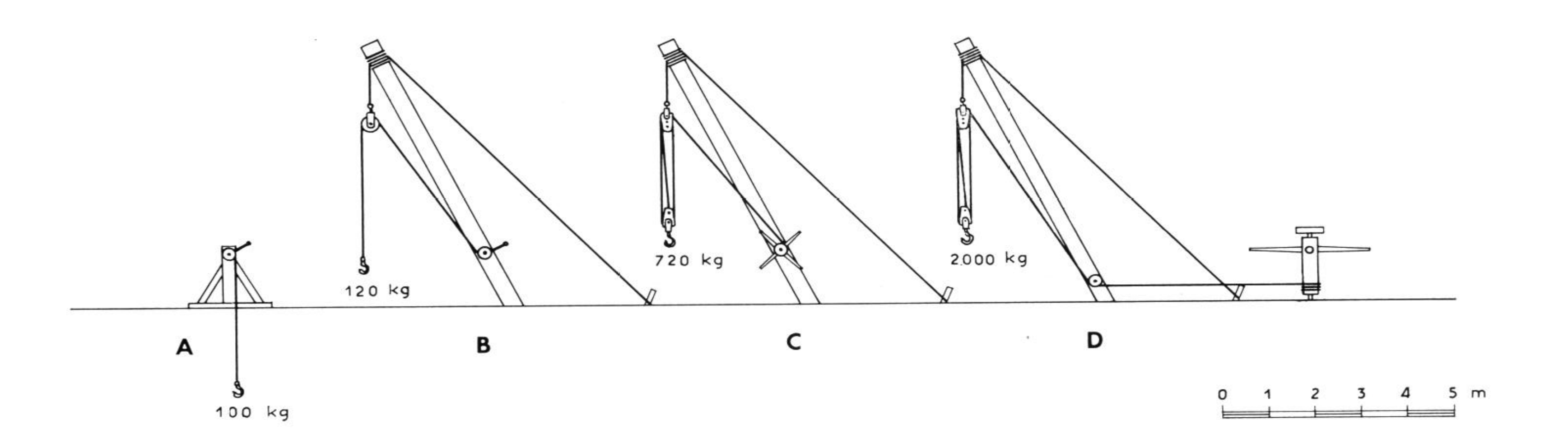




A MACHINE DE CTESIPHON
B MACHINE DE METAGENES
d'après les descriptions de VITRUVE J.P. ADAM

Fig. 2.

» les chemins traversaient un terrain peu solide et qu'il craignait que le poids » de la charge ne fît enfoncer les roues, s'y prit de cette manière : Il assembla, » quatre pièces de bois de quatre pouces en carré, dont deux, les plus



MACHINES DE LEVAGE DE FAIBLE ET MOYENNE PUISSANCE.

J.P. Adam

A - TREUIL SIMPLE

tambour de $r = 10$ cm - manivelle de $L = 40$ cm

force exercée = 15 kg

charge soulevée $P = F.\frac{L}{r} = 15.\frac{40}{10} = 60$ kg

manivelle double = 120 kg

résistance due aux frottements = 0,8 $120 \times 0{,}8 =$ 96 kg

B - CHEVRE A TREUIL ET POULIE

treuil $r = 10$ cm - manivelle $L = 40$ -

force exercée = 15 kg

charge soulevée $P = 15.\frac{40+10}{10} = 75$ kg

manivelle double = 150 kg

$150 \times 0{,}8 =$ 120 kg

C - CHEVRE A TREUIL ET PALAN

treuil $r = 10$ - bras $L = 60$ $F = 15$ kg

palan à 5 poulies $F \times 5$

charge soulevée 1 homme $P = \left(15.\frac{60}{10}\right).5 = 450$ kg

2 hommes $P = 900$ kg

$900 \times 0{,}8 =$ 720 kg

D - CHEVRE A CABESTAN ET PALAN

cabestan $r = 15$ - bras $L = 130$ - force = 15 kg

palan à 5 poulies $F \times 5$

charge soulevée par 4 hommes :

$P = \left[(F.4).\frac{L}{r}\right].5 = \left[(15 \times 4).\frac{130}{15}\right].5 = 2.600$ kg

$2.600 \times 0{,}8 =$ 2.080 kg

Fig. 3.

» courtes, étaient jointes en travers avec les deux autres, qui étaient d'une » longueur égale au fût de chaque colonne. Il enfonça aux deux bouts de » chaque colonne des boulons de fer faits à queue d'hironde et les y scella » avec du plomb, ayant eu le soin de mettre dans les pièces de bois transver- » sales des anneaux de fer, dans lequel les boulons entraient comme dans » des moyeux. De plus, il affermit sa machine en y attachant aux deux » bouts des liens en chêne, en sorte que lorsque les bœufs tiraient, les » boulons tournaient avec tant de facilité dans les anneaux, que tous les » fûts des colonnes roulèrent aisément sur la terre jusqu'à leur destination » (fig. 2). »

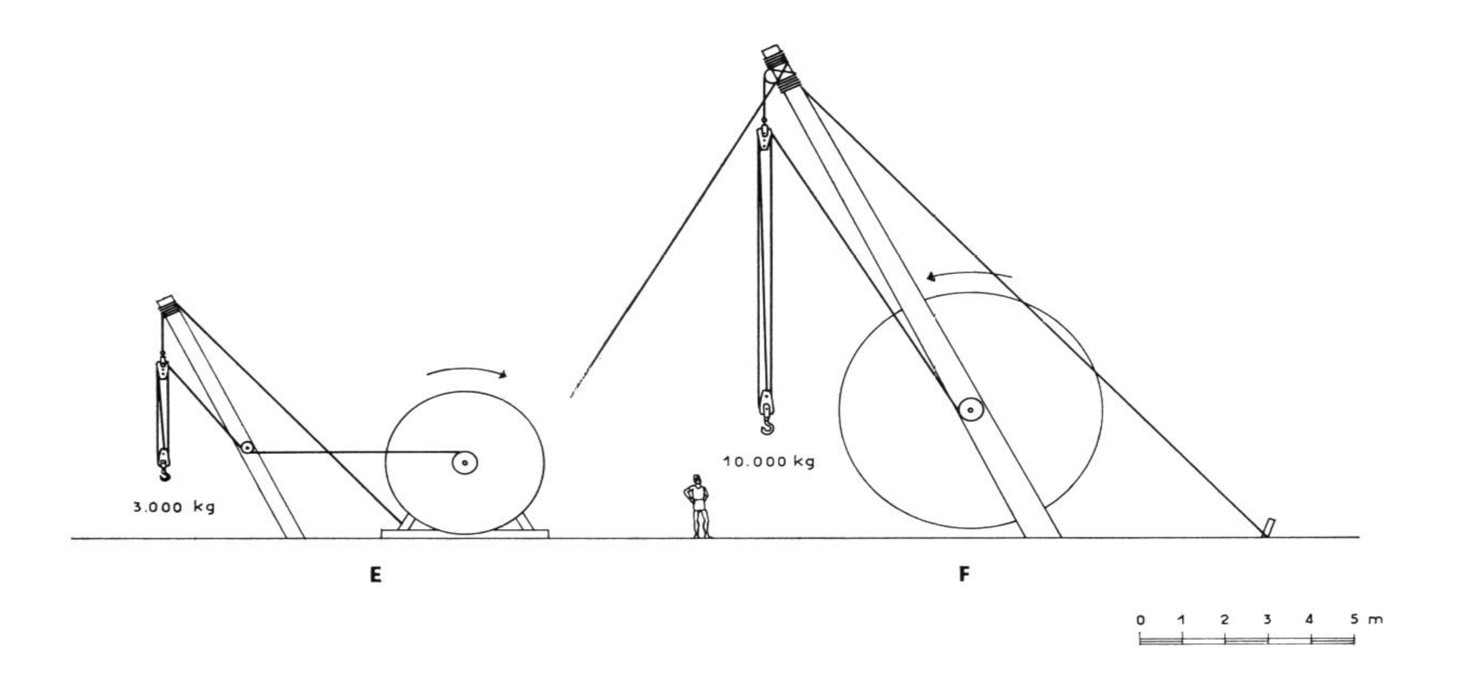
Ctésiphon avait ainsi réalisé, avec les fûts des colonnes, des rouleaux analogues à ceux utilisés en agriculture, le dispositif de roulement étant constitué, dans ce cas particulier, par l'objet à transporter lui-même. C'est d'ailleurs ce que Vitruve déclare en disant que « ...l'invention de cette » machine est prise des rouleaux avec lesquels on aplanit les allées des » palestres ».

Le second moyen de transport destiné aux mégalithes décrit par Vitruve, fut mis en œuvre pour déplacer les blocs de forme parallélépipédique donc impropres au roulage : « Métagènes, fils de Ctésiphon, fit une » autre machine pour amener les architraves et autres parties de l'entable- » ment. Elle était composée de roues de douze pieds (env. 3,60 m) et il » enferma les deux bouts des architraves dans le milieu des roues. Il y mit » aussi des boulons et des anneaux de fer, en sorte que lorsque les bœufs » tiraient la machine, les boulons mis dans les anneaux de fer faisaient » tourner les roues. C'est ainsi que les architraves, qui étaient dans les roues » comme des essieux, furent traînées et amenées sur place » [1].

Vitruve n'évoque là que les anecdotes relatives aux inventeurs présumés de ces moyens de transport, mais ces deux machines, remarquables de simplicité et d'efficacité, furent fréquemment employées pour les déplacements d'éléments d'architecture de grande taille, puisque les traces d'utilisation de la machine de Métagenès furent retrouvées jusqu'en Sicile [2].

(1) Vitruve, « Les dix livres d'architecture » Livre X, traduction de Charles Perrault, Édition de Tardieu et Coussin, Paris 1837, édition de A. Dalmas, Paris 1965 ; les commentaires les plus complets se trouvent dans la traduction de A. Choisy, rééditée par F. de Nobele, Paris 1971.

(2) R. Koldewey et O. Puchstein, « Die griechischen tempel in Unteritalien und Sizilien », 1899, t. I, p. 120.



MACHINES DE LEVAGE DE GRANDE PUISSANCE.

E – CHEVRE A TAMBOUR ET PALAN

levier exploité du tambour L = 140 cm

treuil r = 25 cm poids d un homme = 70 kg

palan à 5 poulies F x 5

charge soulevée par 2 hommes :

$$P = \left[(F.2).\frac{L}{r}\right]5 = \left[(70 \times 2).\frac{140}{25}\right]5 = 3.920 \text{ kg}$$

$$3.920 \times 0{,}8 = \underline{3.136 \text{ kg}}$$

F – CHEVRE A GRAND TAMBOUR ET PALAN

levier exploité du tambour L = 230

treuil r = 25 cm poids d un homme = 70 kg

palan à 5 poulies F x 5

charge soulevée par 4 hommes :

$$P = \left[(F.4).\frac{L}{r}\right].5 = \left[(70 \times 4).\frac{230}{25}\right].5 = 12.875 \text{ kg}$$

$$12.875 \times 0.8 = \underline{10.300 \text{ kg}}$$

NOTA : La puissance de ces machines est limitée par la résistance des câbles donc par l'encombrement dû à leur multiplication .

Ø 2 cm ⟶ 500 kg
Ø 4 cm ⟶ 2.000 kg

J. P. Adam

Fig. 4.

Plus élaborées sont les machines faisant appel aux poulies et à leurs différents modes d'assemblage permettant une importante démultiplication de la charge ; ces machines sont elles aussi fort bien décrites par l'auteur des « dix livres ». Nous allons en rappeler rapidement la nomenclature en introduisant les éléments analytiques permettant de fournir la preuve (à posteriori) de leur efficacité (fig. 3 et 4).

La plus simple de ces machines est la poulie ; la poulie n'offre d'ailleurs aucune démultiplication, au contraire elle ajoute au poids à soulever des frottements, très réduits il est vrai, qui seront à vaincre en sus. Mais, avantage considérable sur la traction verticale directe, la poulie permet à l'ouvrier d'utiliser tout son poids (à la limite) en agissant sur la corde de traction vers le bas. La première machine à démultiplication est le treuil dont la puissance est directement fonction de la longueur de la manivelle. Ainsi un treuil à manivelle double, d'usage courant, permet à deux ouvriers de hisser des charges de 100 kilos avec un effort individuel n'excédant pas 15 kilos (1).

Après le treuil nous trouvons la machine de levage la plus universellement employée : la chèvre. Cet engin se compose généralement de deux pieds liés au sommet et maintenus écartés au bas, haubannés vers l'arrière (parfois aussi vers l'avant pour éviter la bascule brutale en cas de rupture de câble) et munis d'un treuil agissant sur une poulie ou un palan. Le grand avantage de cet assemblage est son adaptation rapide à des puissances allant d'une centaine de kilos à plusieurs tonnes, suivant le type de treuil ou de palan adopté. Nous avons choisi d'illustrer avec les mêmes pieds, quatre montages différents donnant respectivement avec treuil et poulie, 120 kg ; avec treuil et palan 5 poulies, 720 kg ; avec cabestan et palan 5 poulies, 2.000 kg ; enfin avec tambour dans lequel tournent des

(1) Nous devons considérer que la main-d'œuvre antique était plus rentable (en déshumanisant la situation) que la main-d'œuvre moderne, car plus nombreuse et plus durement traitée elle fournissait un effort plus grand, mais avec la possibilité d'un relais plus fréquent. Ainsi les chiffres de 15 à 25 kg pour un effort individuel, pris pour l'antiquité, ne sont plus sur les chantiers du XXe siècle que de 8 à 15 kg. Les formules mathématiques de définition des différentes machines, sont données en regard des figures.



Fig. 5. — Tombeau des Haterii, collections du Latran, musée du Vatican *(Photo J. P. Adam)*.

ouvriers (la « cage d'écureuil » en usage dans les carrières jusqu'au début du siècle) et palan 5 poulies, 3 tonnes.

Enfin pour les charges exceptionnelles supérieures à 3 ou 4 tonnes le montage nécessite un tambour de grand diamètre dans lequel peuvent tourner quatre ou cinq hommes (ou plus) on obtient alors des puissances dépassant 10.000 kg. Dans ces conditions de travail la machine devient spécifique des grosses charges et le tambour est directement fixé sur les pieds de la chèvre dont la hauteur peut être considérable (10 à 15 m).

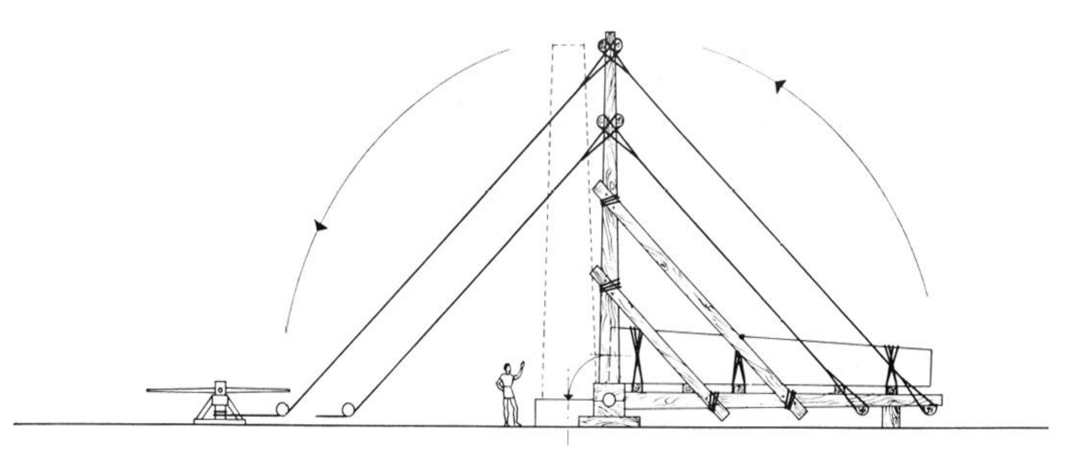


Fig. 6. Dressage des fûts monolithes. *(J.-P. Adam)*

Fort heureusement des reliefs d'époque romaine viennent illustrer le texte de Vitruve et confirmer la généralisation d'emploi de telles machines (1). La plus explicite de ces représentations se trouve sur un relief de monument funéraire, le tombeau des Haterii, conservé au musée du Vatican dans les salles destinées aux collections du Latran (fig. 5). La machine, presqu'entière contenue sur le seul panneau de marbre conservé est du type chèvre à tambour, cinq hommes assurent la mise en mouvement tandis que deux ouvriers au sol, freinent le cylindre, pour l'arrêter au moment voulu, à l'aide de câbles le ceinturant. Sept palans, cinq vers l'arrière, deux vers l'avant, assurent la mise en tension des haubans d'ancrage, tandis qu'un gros palan vertical à quatre poulies, commande le levage de la charge. On remarque les échelons permettant d'accéder au sommet de la machine où deux ouvriers sont précisément occupés à fixer un chapeau de vannerie dans lequel sont plantés les rameaux de faîtage, tradition conservée par les charpentiers du xx^e^ siècle (2).

Le dressage des grands fûts monolithes faisait appel à des machines spécifiques dont le schéma, représenté ici (fig. 6), ne s'est guère modifié

(1) Voir R. Amy « L'Arc d'Orange » XV^e^ sup. à Gallia, Paris 1962, pp. 70-71. — Blümner, « Technologie », III, p. 118. — F. Kretzschmer, « La technique romaine », p. 24 à 26. — A. Orlandos, « Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs », t. II, p. 43.

(2) Kretzschmer *(op. cit.)* avait donné de cette figure une explication erronée, mettant en doute la facture réaliste du relief.

jusqu'au XIX^e siècle. La pièce à dresser est couchée sur un brancard constituant l'un des bras d'une équerre à 90° ; l'autre bras solidement relié au premier étant dressé verticalement. En tirant sur le bras vertical jusqu'à l'amener au niveau du sol, à l'aide de câbles reliés à des cabestans, on provoquera le redressement du premier bras et de la charge. L'emplacement et le mouvement de la machine étant prévus pour venir placer la base du fût de pierre sur son socle, le levage et la mise en place seront réalisés en une seule opération [1].

*
* *

Avant d'aborder la solution archéologique propre à Baalbek, nous allons évoquer trois transports de mégalithes qui, bien que réalisés à des époques modernes, ont fait appel à des procédés très comparables à ceux dont l'Antiquité disposait, et peuvent être considérés à juste titre comme des témoignages. Il s'agit, dans leur ordre chronologique : du transport du mégalithe de granite de Saint-Petersbourg, du déplacement de l'obélisque de Louqsor et de celui du monolithe de Mussolini.

*
* *

1.250.000 kilogrammes ! c'est le poids du formidable bloc de granite que l'impératrice de Russie Catherine II (1762 à 1796) fit transporter à Saint-Pétersbourg (aujourd'hui Léningrad) pour servir de socle colossal à la statue équestre de Pierre le Grand. Il s'agit là fort probablement de la plus grosse pierre jamais déplacée par l'homme, une fois et demie le poids des blocs du trilithon [2].

Le bloc choisi se trouvait à 6 kilomètres de la mer, sur la côte du golfe de Finlande, au-delà d'une zone marécageuse dont la traversée était

[1] VIOLLET-LE DUC propose pour le Moyen Age une solution identique, dans son « dictionnaire de l'architecture » au t. V, p. 213.

[2] J. Rondelet architecte et théoricien 1743-1829, rapporte les péripéties de ce transport, dans son « Art de bâtir », t. I, pp. 97 à 100.

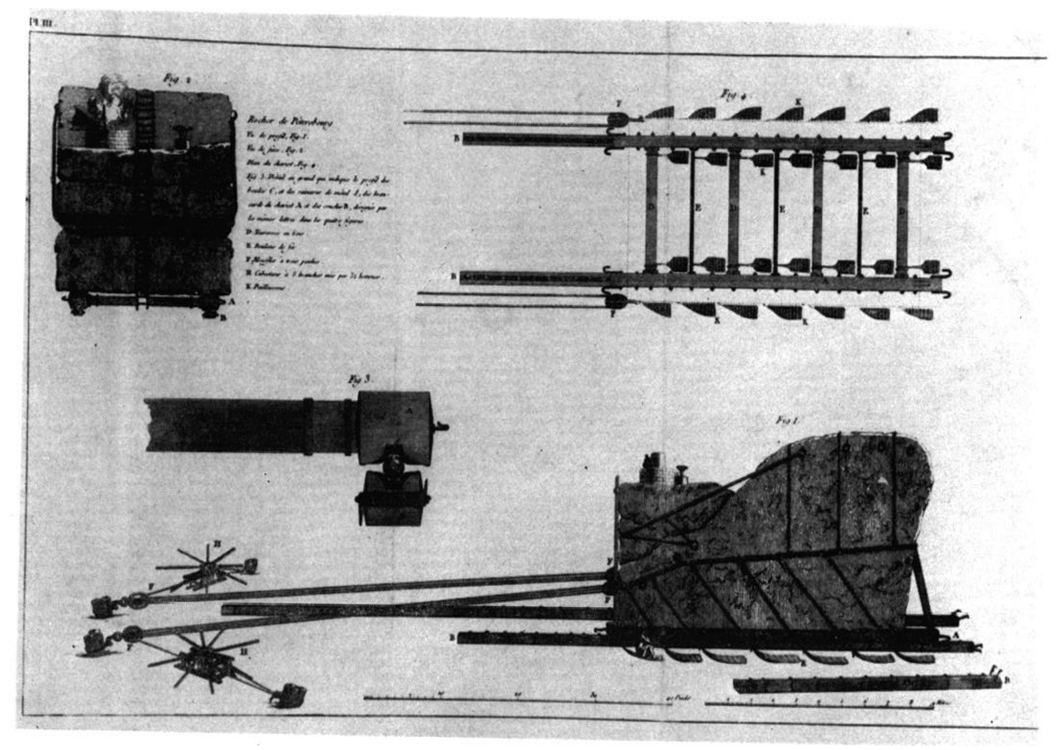


Fig. 7. — Transport du mégalithe de Saint-Pétersbourg. J. RONDELET, *L'Art de bâtir*, Paris, 1812, t. I, pl. III *(Photo J. P. HRAND)*.

nécessaire si l'on ne voulait emprunter un itinéraire trop considérable et par surcroît accidenté.

L'ingénieur chargé de ce travail, le comte de Carbury, prépara si bien le transport que celui-ci n'exigea que 64 hommes ! Ce chiffre est aussi stupéfiant par sa faiblesse, que peut l'être celui du poids déplacé, par son gigantisme.

Carbury avait fait glisser progressivement sous le bloc un fort traîneau constitué de deux poutres, tenant lieu de patins, ayant 13 mètres de long, 49 cm de large et 43 cm d'épaisseur. La partie inférieure en était creusée en forme de canal, dans le fond duquel on avait fixé une garniture métallique réalisée en alliage cuivre-étain-calamine. Sept traverses maintenaient l'ensemble rigide. Ce traîneau glissait, ou plutôt roulait, sur deux paires de poutres en bois s'alternant suivant la progression et lui tenant lieu de chaussée. La surface de ces « rails » possédait un canal analogue à celui des patins, constituant ainsi un espace circulaire permettant d'interposer entre

la charge et la voie, des boules de même alliage que le chemin de roulement ayant un diamètre de 13,5 cm, au nombre de 16, sous chaque patin [1].

Les câbles de traction passaient par deux palans de 3 poulies et venaient s'enrouler autour de deux cabestans seulement, manipulés chacun par 32 hommes ; chacun exerçant un effort de 20 kg, leur puissance totale fournie s'élevait à 1 280 kg. En tirant directement la charge sur un sol nu, cette force de traction n'aurait permis de déplacer qu'une pierre de 1.920 kg seulement ! L'ingéniosité d'un homme l'a rendue capable de tirer sur 6 kilomètres une masse de 450 m^3 pesant 1.250 tonnes [2]. Les conditions topographiques n'étaient pourtant pas idéales. Le marécage constituant, en raison de sa fluidité, un obstacle difficilement franchissable, l'ingénieur attendit un temps de fortes gelées pour commencer la progression. Malgré le froid il se trouvait par endroits des couches de limon gras empêchant la gelée du sol en profondeur ; aussi, pour affermir le terrain, il fut nécessaire de décaper ce limon et de le remplacer par des couches alternées de gravier et de troncs de petits sapins. Très rapidement l'humidité du sous-sol remonta à travers ce nouveau terrain et le fit geler solidement permettant aisément le passage du fardeau. Ces contre-temps ralentirent l'avance et la distance complète, pour arriver au radeau d'embarquement, ne fut franchie « qu'en » six semaines.

Il est utile de connaître les détails de la machine de traction pour mieux réaliser son efficacité. Les 64 hommes préposés à la manœuvre, étaient répartis sur les 8 barres de chaque cabestan à raison de quatre par barre. Ces barres avaient une longueur de 2,60 m et le point moyen d'application des forces se trouvait à 1,60 m du centre du tambour, dont le rayon était de 10 cm. La formule du treuil nous permet d'obtenir la puissance des deux cabestans, soit 20.480 kg. Cette puissance surmultipliée par les palans (2 palans de 3 poulies en parallèles) était portée à 61.440 kg mais les frottements la ramenaient à 50.000 kg ; il en résulte que la force mise en œuvre

(1) La très faible surface portante des sphères si elle élimine les frottements mieux qu'avec l'usage de rouleaux, a l'inconvénient de les rendre vulnérables à l'écrasement, d'où la nécessité de cet alliage métallique.

(2) Ce procédé fut remis en application en 1931 par les architectes Anus et P. Coupel, au cours de leurs travaux de remontage de l'escalier du temple de Jupiter à Baalbek.

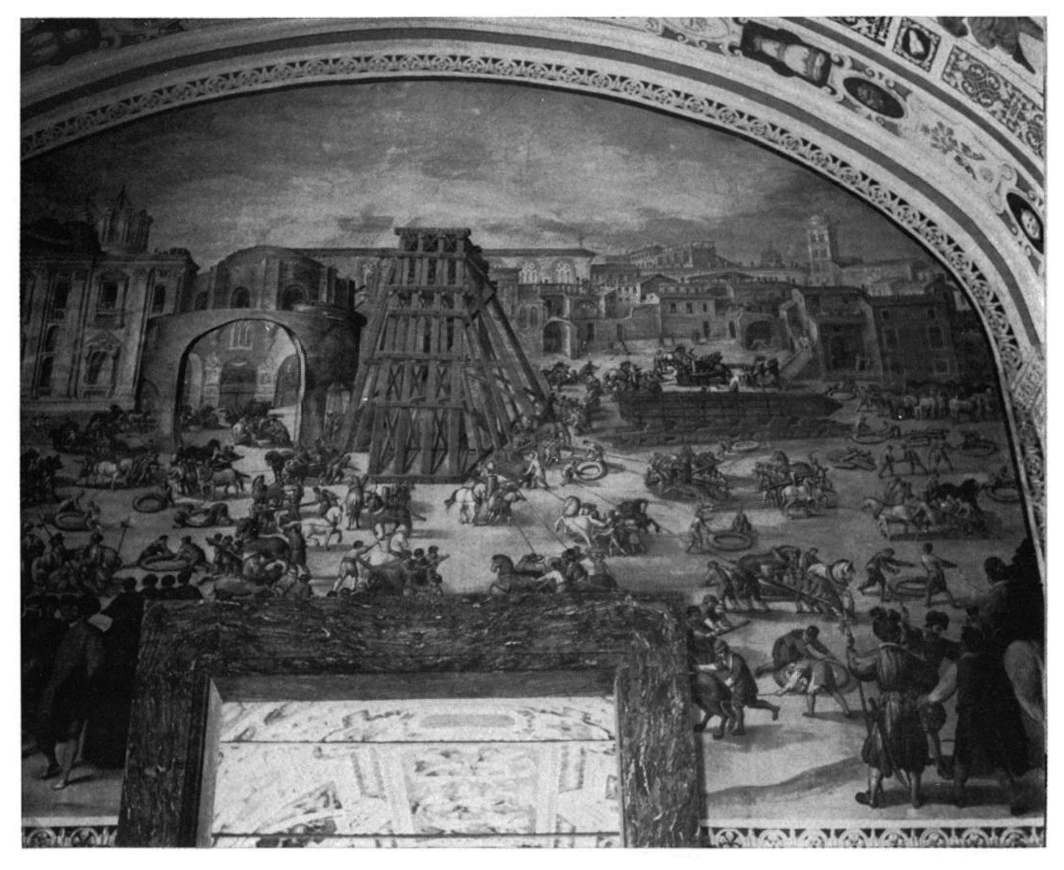


Fig. 8. — Transport et dressage d'un obélisque par D. FONTANA, Fresque du Vatican *(Photo J. P. Adam)*.

était égale au 1/23e du poids de la charge, fraction due à l'efficacité du système de roulement réduisant considérablement les frottements (Fig. 7).

L'histoire des techniques avait trop injustement oublié le comte de Carbury, il convenait de lui redonner sa juste place, aux côtés de ceux qui ont défié l'impossible ou le surhumain.

Du Nil à la Seine :

Avec le transport de l'obélisque de Louqsor nous abordons, outre une anecdote fort célèbre, un problème sensiblement différent puisqu'il s'agit du dressage d'une aiguille de pierre de 22,83 m de hauteur. En dépit d'un poids voisin de 200 tonnes, donc inférieur de beaucoup, à celui du mégalithe de Saint-Pétersbourg, cet obélisque présentait, en raison de sa station verticale, des difficultés de manœuvre notablement plus délicates. Notons

d'abord, que dans l'optique archéologique moderne, une telle « récupération » est parfaitement condamnable, mais si l'on se place dans le contexte de ces années 1830, époque à laquelle toute l'Europe dévorait avec passion les prodigieux volumes de la commission d'Égypte, magnifiés de surcroît par la géniale découverte de Champollion, et que l'on sait en outre dans quelles conditions le monument échut à la France, on s'efforce à l'indulgence. D'autant plus que cet exercice technique a constitué une expérience fort enrichissante sur les procédés de levage des colonnes monolithiques dans l'Antiquité grecque et romaine. En effet, les machines utilisées pour coucher l'obélisque, pour le traîner puis pour le redresser étaient toutes des machines de marine à poulies, palans et cabestans, c'est-à-dire conformes aux développements techniques gréco-romaines [1].

C'est au vice-roi d'Égypte, Méhémet-Ali, que l'on doit en fait, d'admirer ce monument à Paris et non plus sur les rives du Nil. A la suite d'un service rendu par la France, le souverain égyptien avait offert à Charles X l'une des deux « aiguilles de Cléopâtre » d'Alexandrie. Une offre analogue avait été faite pour la même raison à l'Angleterre qui avait décliné le présent, arguant des trop grandes difficultés posées par le transport. Les français l'ayant accepté, le choix se porta finalement sur l'un des deux obélisques de Louqsor, jugés plus beaux et mieux conservés que ceux d'Alexandrie.

L'expédition chargée de ramener le monolithe fut placée sous la direction du lieutenant de vaisseau de Vernicac de Saint-Maur (futur ministre de la Marine), tandis que la préparation technique en était confiée à l'ingénieur Lebas (futur conservateur du Musée de la Marine). Pour recevoir l'étonnant fardeau on avait construit, sur les cales de Toulon, un navire spécial baptisé fort à propos *Louxor*. Il s'agissait d'une allège de 39 mètres de long, à faible tirant d'eau (2,40 m une fois chargée) pouvant d'abord franchir la barre du Nil, puis naviguer jusqu'en Haute-Égypte sur un fleuve aux bancs de sable nombreux. En fait si le transport fut si long (départ de Toulon en avril 1831 et arrivée à Paris en décembre 1833) c'est essentiellement en raison du tonnage du navire, contraint qu'il était

[1] Mais fort différents de ceux de l'Égypte ancienne.

d'attendre les hautes eaux du Nil aussi bien pour aborder à Louqsor que pour en partir. Après la traversée de la Méditerranée c'est un voyage de 700 km à contre-courant sur le grand fleuve, que le *Louxor* dut faire pour arriver à destination ; voyage durant lequel il s'échoua souvent, contraignant l'équipage à haler le navire à l'aide des cabestans reliés à des ancres de jet ou à des pieux. Enfin le 14 août l'allège était à pied-d'œuvre, amarrée perpendiculairement à la rive à 300 m de l'obélisque.

Lebas, ayant précédé le *Louxor* de deux semaines, avait déjà préparé le terrain et une chaussée en pente douce avait été aménagée jusqu'au point d'embarquement. L'obélisque fut alors entouré d'un épais coffrage de protection dont l'efficacité évidente était compensée par un surcroît de poids non négligeable. Pour accompagner la descente du géant de granite, on édifia un immense cadre formé de huit mâts de levage, quatre de chaque côté, reliés entre eux à leur tête par une poutre les faisant travailler ensemble, et manœuvrés par autant de palans. Tout fut prêt le 31 octobre et l'on put procéder à la manœuvre d'abattage [1].

Dans un premier temps le monolithe bascula sur sa base jusqu'à se poser sur la moitié de sa hauteur sur un plan incliné en terre, dans un second temps il bascula par dessus l'arête du plan incliné pour se trouver sur la pente de la rampe devant le conduire au navire. Lebas avait si exactement calculé l'opération, qu'elle se déroula en vingt-cinq minutes sans le moindre incident !

L'obélisque, tiré par quatre cabestans, fut acheminé ensuite jusqu'au *Louxor*, dont l'avant était ouvert. Mais entre temps les eaux du Nil avaient baissé et l'allège se trouvait complètement à sec à cent mètres de la berge. Il fallut patienter de longs mois pour que l'eau du fleuve vienne délivrer le bateau et l'appareillage ne put s'effectuer que le 25 août. De nouveau immobilisé par les bancs de sable de la barre de Rosette, le *Louxor* ne fit son arrivée à Alexandrie que le 12 janvier 1833. Dans ce port, l'équipage dut encore patienter plus de deux mois pour qu'un navire remorqueur,

(1) Voir la maquette exposée au musée de la Marine à Paris et les gravures publiées par l'« Illustration ». Collection des Grands ouvrages », Histoire de la Marine », Paris 1942, p. 276-277.



Fig. 9. — Rome. Obélisque originaire d'Héliopolis (xv^e s. av. J.-C.) élevé d'abord dans le Circus Maximus, puis près de Saint-Jean-de-Latran en 1588 par Dominique FONTANA *(Photo J. P. Adam)*.

le *Sphinx*, vienne le chercher. Enfin, le 12 mai, les deux vaisseaux l'un remorquant l'autre, sont à Toulon ; simple escale puisqu'il faut encore contourner l'Espagne, et remonter la Seine jusqu'à Paris, où le navire vient s'amarrer le 23 décembre près du pont de la Concorde [1].

Tout n'était pas fini, il fallait reprendre sur la grande place parisienne l'opération inverse de celle exécutée sur les rives du Nil, suivant un procédé rigoureusement identique, mais avec cette fois un mouvement ascendant. Encadré par dix mâts de levage, cinq de chaque côté, mis en mouvement par un ensemble de 10 cabestans, l'obélisque fut enfin dressé sur son socle, en présence de milliers de parisiens anxieux et émerveillés [2].

(1) Mort le 4 mars 1832, âgé seulement de 42 ans, Champollion ne put assister à cette apothéose parisienne de l'Égyptologie des pionniers.

(2) Lebas put s'appuyer pour cette opération, sur les expériences de l'architecte Dominique Fontana qui effectua à Rome des travaux analogues pour le pape Sixte-Quint. Il dressa notamment l'obélisque de la place Saint-Pierre (une fresque du Vatican illustre cette entreprise, fig. 8), celui de la place du Peuple et celui de Saint-Jean-de-Latran, le plus grand de tous avec ses 32 m de hauteur (fig. 9).

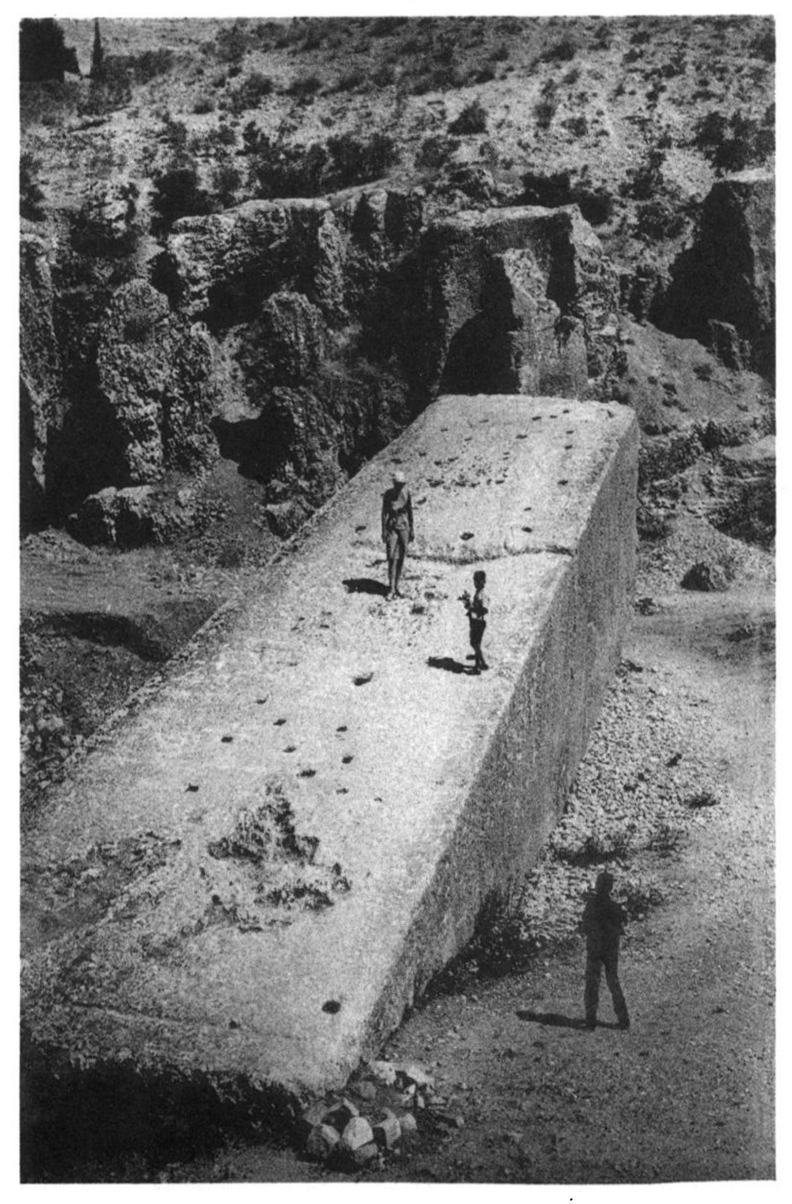
1. — La façade Ouest du podium et le trilithon *(photo J. P. Adam)*

2. — Le temple de Jupiter Héliopolitain, face Sud. Au pied du podium central, le podium mégalithique *(photo J. P. Adam)*

BAALBEK



1. — L'intervalle entre les deux podiums sur le côté Nord *(photo J. P. Adam)*



2. — Le mégalithe inachevé dans la carrière de Cheikh Abdallah *(photo J. P. Adam)*

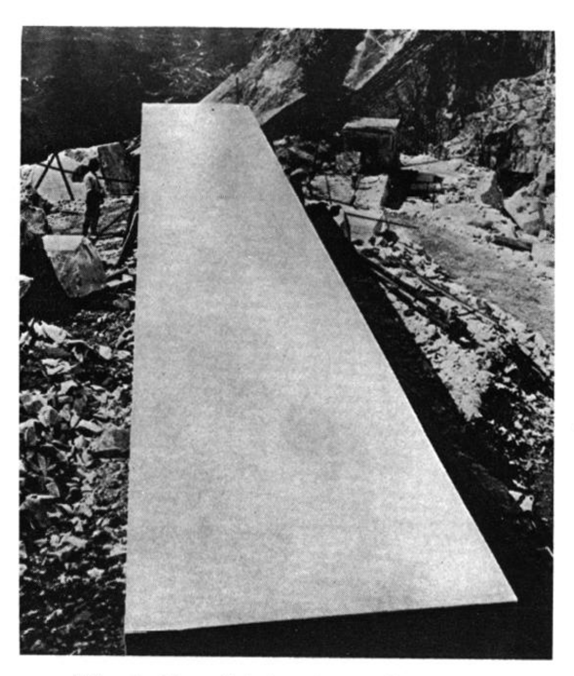


Fig. 10. — Le monolithe de Mussolini dans la carrière de Carrare *(Photo Hrand)*.

Comme un empereur.

Comme chacun le sait, Benito Mussolini était un homme discret ; c'est donc en toute simplicité qu'il prit en 1928 la décision de se faire élever à Rome, un obélisque qui soit l'égal des plus grands que l'on ait jamais dressé. La matière première, du marbre blanc de la plus grande finesse, fut extraite des célèbres carrières de Carrare, situées dans la montagne à quelque distance de la côte, à l'Est de La Spezia.

Les deux premières parties de l'opération pour spectaculaires qu'elles soient n'offrent aucun intérêt archéologique, puisque la masse de marbre nécessaire fut détachée de la montagne à l'aide d'une scie à fil hélicoïdal, après quoi, le 28 novembre 1928 le bloc fut descendu de sa plate-forme d'extraction jusqu'à la vallée à l'aide d'un système funiculaire de câbles d'acier. C'est à partir de cet instant que l'on retrouve avec intérêt une technique de l'Antiquité. Le parallélépipède de marbre, d'une longueur de 32 m, sur 2,5 m de section carrée pesait 560 tonnes (fig. 10), poids respectable auquel il convient d'ajouter encore celui de l'emballage protecteur, comparable à celui de l'obélisque de Louqsor et dont la partie inférieure tenait lieu de traîneau. Une soixantaine de bœufs accouplés

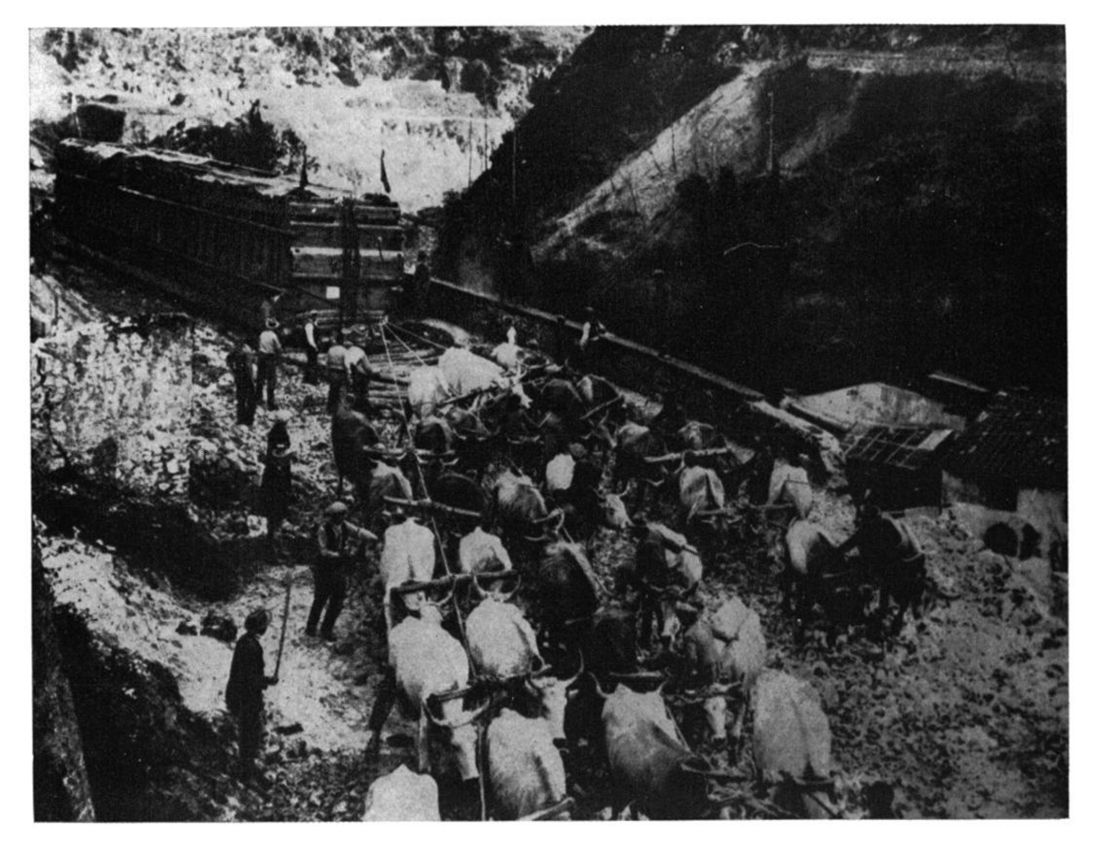


Fig. 11. — Transport du monolithe de Mussolini *(Photo Hrand)*.

furent alors attelés au fardeau dont la progression fut facilitée par un grand nombre de rondins de bois déplacés au fur et à mesure de l'avance du convoi (fig. 11). Le travail le plus éprouvant fut d'ailleurs le transport continuel de ces troncs de sapin de l'arrière à l'avant de l'énorme charge. Autre facteur favorable au transport, une déclivité permanente au profil artificiellement adouci, apporta une aide précieuse à l'attelage.

Arrivé à la Marina di Carrara, l'étonnant cortège fut dissout et le monolithe, chargé sur un radeau, fut remorqué par voie de mer jusqu'au Tibre d'où il put atteindre la capitale. Après une dernière taille de mise en forme, l'obélisque fut érigé sur le *Foro Italico* près du stade olympique au Nord-Ouest de Rome.

Dans cette recherche orgueilleuse de l'exploit technique le dictateur italien ne faisait que rééditer le geste de Dioclétien faisant élever à Alexandrie, capitale pensante du monde hellénistique et héritière de la civilisation

égyptienne, une gigantesque colonne monolithique [1]. Cette réplique « à la romaine » des obélisques, est constituée d'un fût de granite en un seul morceau de 20,46 m de hauteur et d'un diamètre à la base de 2,71 m, son poids est de 285.000 kg. L'érection d'un tel monument en Égypte, était pour les romains une manifestation de leur amour-propre face aux multiples témoins d'une architecture mégalithique devant laquelle ils ne pouvaient s'incliner de bonne grâce. C'est dans cette optique qu'il faut considérer la réalisation des monuments de Baalbek. Il s'agissait sur ce site d'Orient, jadis terre phénicienne, conquise par Pompée en 64 av. J.-C., d'élever un sanctuaire monumental dépassant tout ce que l'architecture locale friande de mégalithisme avait pu édifier, afin que cette lointaine colonie puisse témoigner de l'inégalable puissance de l'Empire [2].

Il est d'ailleurs significatif de rappeler que les romains ont multiplié dans cette partie du monde, les temples constitués de pierres de dimensions inusitées, tant pour les raisons politiques précitées que parce que les techniciens locaux participaient aux chantiers avec leurs méthodes et leurs traditions [3]. Un article d'E. Will souligne cet état de chose, article dans lequel l'auteur apporte une riche documentation à l'appui de cette observation [4].

Pour bien apprécier l'ampleur du travail accompli, et justifier la

(1) Improprement appelée « Colonne de Pompée », elle fut érigée en 297 pour commémorer la victoire de Dioclétien sur les alexandrins révoltés. Elle mesure 26,85 m avec la base et le chapiteau (K. Michalowski, « L'Art de l'Ancienne Égypte », Paris 1971, p. 503).

(2) Les vestiges de remparts et d'installations portuaires phéniciennes du XI^e^ au VIII^e^ siècle av. J.-C. abondent en exemples de mégalithisme (Sidon, Rouad, Tyr). On a dégagé en septembre 1971 dans le mur du Temple de Jérusalem, édifié par des bâtisseurs phéniciens, une pierre mesurant 13,50 m de long sur 3,50 m de haut. Son épaisseur, prise dans le mur, n'est pas connue mais on peut la supposer égale à la hauteur, ce qui donne à ce bloc le poids formidable de 413 tonnes.

(3) Voir : G. Contenau « Manuel d'Archéologie Orientale », t. III, « La Phénicie - Architecture », Paris 1931. — M. Dunand, « Phénicie » in supplément VII-40 au dictionnaire de la Bible, Paris 1965. — S. Moscati, « the Phoenicians », Londres 1965. — A. Parrot, « Le temple de Jérusalem », Paris 1954. — G. Perrot et Ch. Chipiez, « Histoire de l'Art dans l'Antiquité », t. III, chap. II.

(4) E. Will, « Du trilithon de Baalbek et d'autres appareils colossaux » in, « Mélanges offerts à K. Michalowski, Varsovie 1965 ; voir aussi : D. M. Krencher et W. Zschietzschmann, « Römische tempel in Syrien », Berlin-Leipzig 1938. A. V. Gerkan in Corolla Ludwig Curtius , 1937 et Th. Wiegand « Baalbek » Berlin-Leipzig 1921-1923 (2 vol.).

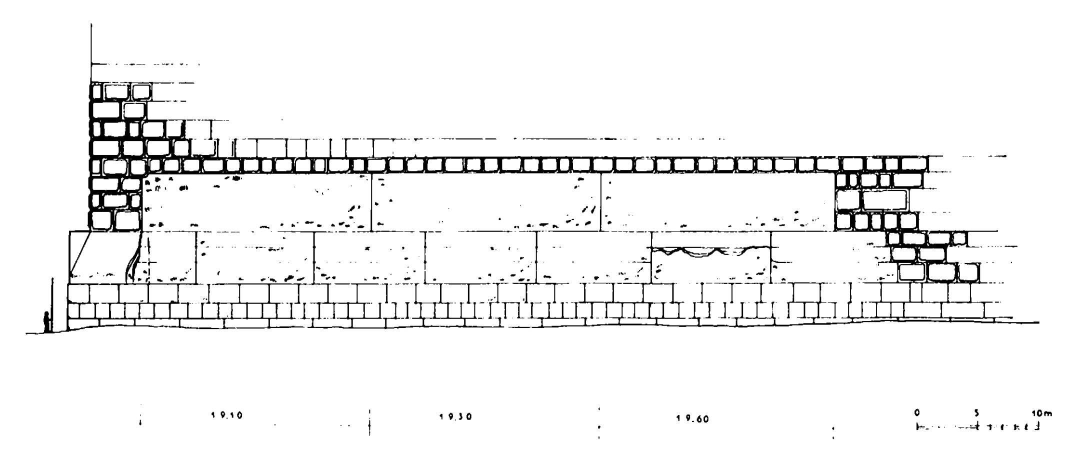


Fig. 12. — Baalbek. Le trilithon. *(M. G. Froidevaux)*

solution qui lui est adaptée, il est nécessaire de donner les chiffres afférents aux blocs les plus pesants, en l'occurrence ceux du trilithon [1]. Comme son nom l'indique cet ensemble est constitué de trois pierres mesurant respectivement 19,60 m, 19,30 m et 19,10 m de longueur, pour 4,34 m de hauteur sur 3,65 m de profondeur. Leur poids moyen approche les 800 tonnes. Cette assise cyclopéenne repose elle-même sur une assise mégalithique dont chaque pierre a près de 10 m de longueur pour un poids moyen de 350 tonnes (fig. 12). Le podium étant demeuré inachevé, seule cette assise se retrouve complète sur les trois côtés Nord, Ouest et Sud. Une telle accumulation de pierres d'une taille aussi démesurée est unique, dans toute l'Antiquité, et l'achèvement de cet ouvrage aurait rendu plus formidable encore cet exploit sans équivalent (fig. 13). La «pierre du Sud», destinée au même édifice, dépasse encore ses homologues du trilithon puisqu'avec 21,50 m de longueur, 4,30 m de largeur et 4,20 m de hauteur, elle atteint un poids de 970 tonnes (Pl. I et II).

Nous n'aborderons nullement le problème archéologique de la datation, estimant en effet que sur le plan technique cette réalisation, quoique correspondant à un programme romain, est de tradition phénicienne. Signalons simplement que dans une chronologie normale de la construction, le podium mégalithique aurait dû être construit après le podium central [2].

(1) Selon E. Will *(op. cit.)*, le terme de « trilithon » apparaît dans Michel le Syrien, IX, 16 (Chabot, II, p. 179).

(2) Le temple lui-même est daté par un graffito exécuté sur la face de pose d'un chapiteau, nous donnant l'année 60 après J.-C., nous serions donc en présence d'un programme Claude-Néron.

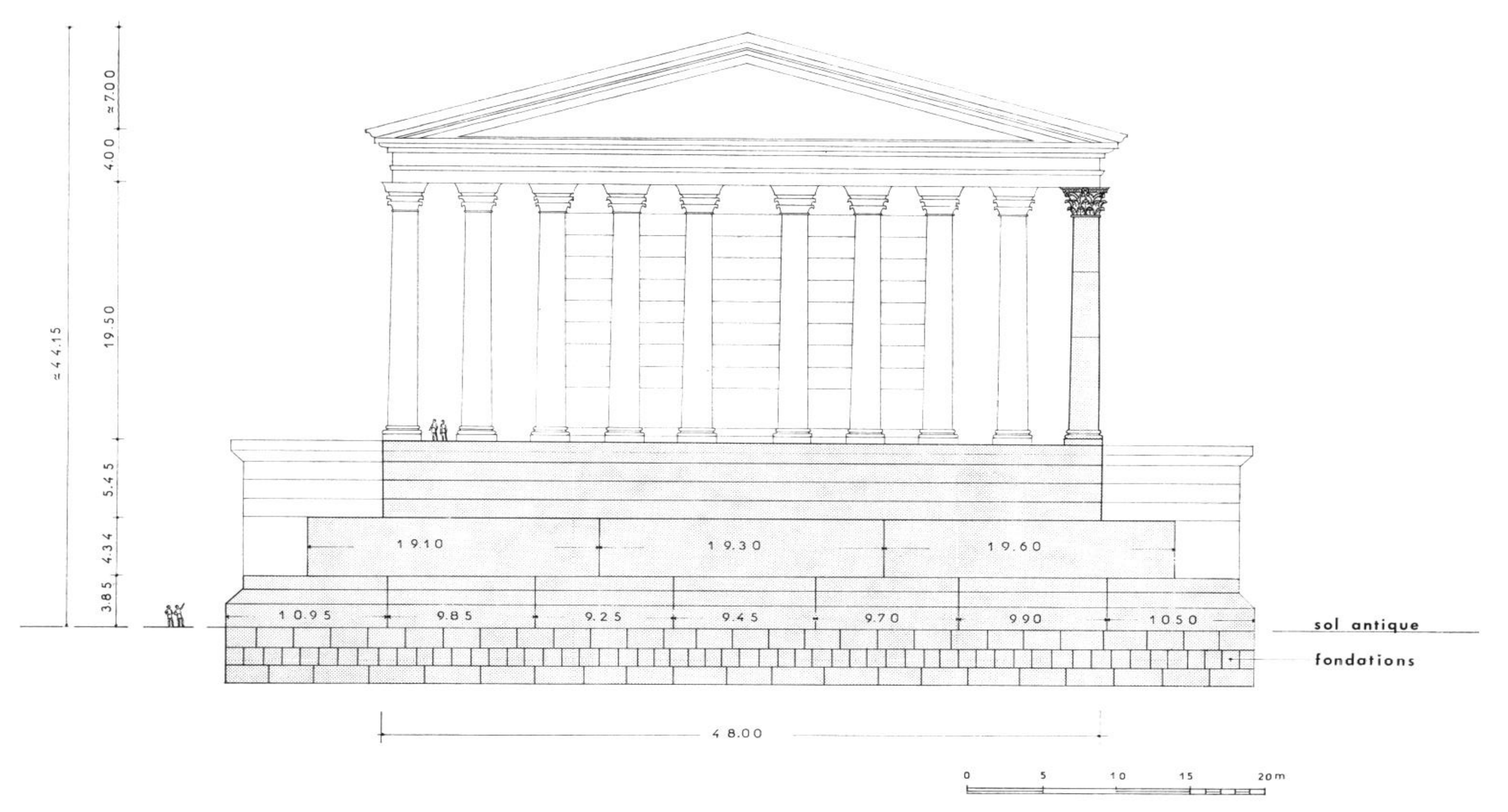


Fig. 13. — Baalbek. Temple de Jupiter Héliopolitain, le trilithon et la façade ouest restitués. *(M. G. Froidevaux).*

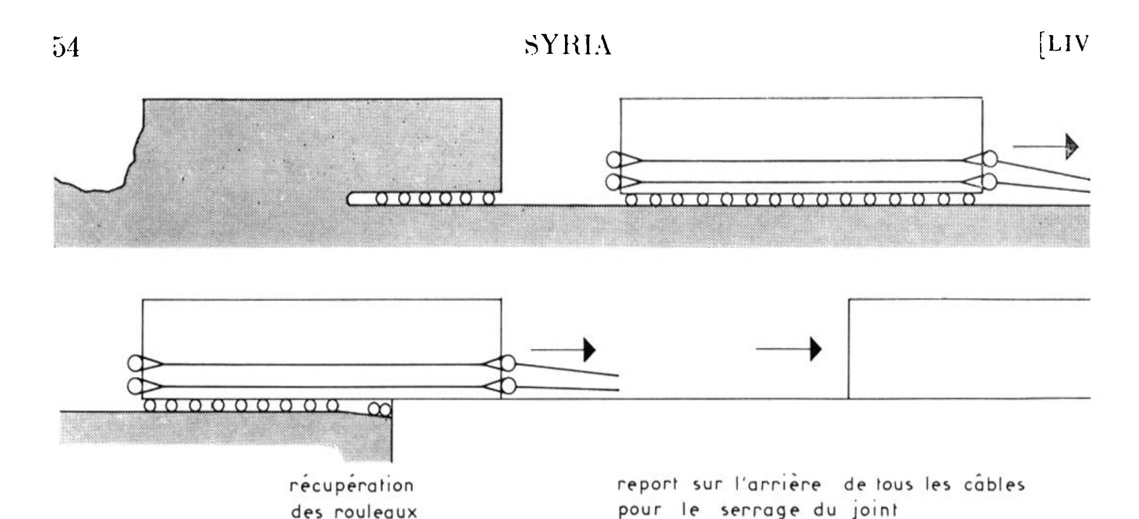


Fig. 14. — Taille, transport et mise en place des blocs du trilithon.

Après le rappel des trois expériences de Saint-Pétersbourg, de Louqsor et de Carrare, nous pouvons aborder avec plus de lucidité la solution propre à cet ensemble mégalithique et plus particulièrement à l'édification du trilithon.

La carrière de Cheikh Abdallah se trouve à une médiocre distance du sanctuaire (800 m) et nous savons par la pierre demeurée en place que l'épannelage était effectué sur le lieu d'extraction de manière à transporter la charge minimum sous une forme de moindre encombrement ; les blocs pouvaient donc une fois taillés, être conduits directement jusqu'à leur lieu de pose. Deux moyens de tractions s'offrent à notre esprit, dont nous venons de considérer l'efficacité : la charge placée sur des rouleaux de bois de cèdre [(1)] pouvait être halée soit à l'aide d'un attelage de bœufs ou de mules, soit à l'aide de cabestans manœuvrés par des ouvriers [(2)], fig. 14.

(1) Les rouleaux sont mis en place au fur et à mesure de la taille du lit de pose (fig. 14).

(2) Pour ses travaux romains, Fontana avait attelé des chevaux aux bras des cabestans mais la coordination des mouvements était difficile à obtenir et rendait cette pratique moins efficace que la traction humaine.

Afin d'acheminer les matériaux depuis la carrière jusqu'au chantier, il a été nécessaire d'aménager une chaussée sur laquelle de longues pièces de bois ont été placées longitudinalement dans le but de constituer une surface dure pour le passage des rouleaux. Compte tenu de la différence de niveau entre le lieu d'extraction et le sanctuaire, les blocs des premières assises ont bénéficié d'une légère déclivité facilitant leur bardage [(1)]. À l'achèvement de chaque assise la chaussée était exhaussée jusqu'à atteindre le niveau de pose supérieur. De cette façon, le transport et la mise en œuvre se résolvaient en une seule opération et le déplacement vertical se trouvait supprimé [(2)].

Pour résoudre le problème de Baalbek de la manière la plus exhaustive, nous allons considérer la mise en place d'un des blocs les plus pesants, c'est-à-dire une des pierres de 800.000 kg constituant le trilithon ; les interventions concernant les éléments moins lourds en seront la déduction logique.

Soit donc une de ces pierres totalement détachée de la roche et reposant sur des rondins. La chaussée de poutres recevant le convoi offre une surface de roulement plane et ferme permettant de réduire la charge initiale au 1/12e de sa valeur, soit 66.600 kg [(3)]. Sachant qu'un bœuf peut fournir un travail de 80 kgm à la seconde [(4)] en continu pendant 1 heure, on en déduit

(1) Une pente trop prononcée est à éviter en raison de la formidable inertie des masses transportées. Il faudrait alors prévoir une manœuvre inverse, c'est-à-dire la retenue progressive des blocs jusqu'à leur arrivée à destination. Ce procédé était utilisé à proximité des carrières du Pentélique pour la descente des pierres (cf. Orlandos, *op. cit.*, t. II, p. 23-24).

(2) Pour le levage des mégalithes, nous renvoyons à A. Choisy « Histoire de l'Architecture », t. I, ch. I et II, où l'auteur fournit des explications à la fois satisfaisantes et argumentées sur ces manipulations.

(3) Pour cette étude nous nous sommes appuyés sur les travaux expérimentaux d'Arthur Morin le continuateur des découvertes de Coulomb, auteur des lois du frottement, et surtout sur les expériences de transport de charges lourdes effectuées par J. Rondelet. Les calculs sont effectués en interposant un dynamomètre entre la charge, de poids connu, et la source de la traction. C'est ainsi que Rondelet et Morin ont déterminé les coefficients de frottement des différentes matières en contact statique et dynamique, soit avec frottement simple soit avec interposition de roulement.

Nous avons eu l'occasion, sur un chantier d'Asie Mineure, de reprendre plusieurs des expériences de Rondelet sur les procédés de bardage des pierres (fig. 15, 16 et 17).

(4) Soit un peu plus d'un cheval-vapeur. C'est Watt qui détermina cette unité en 1769 en construisant une machine à vapeur destinée à remplacer un robuste cheval pour assurer le fonctionnement d'une machine élévatrice. Ses calculs lui donnèrent 76 kgm à la seconde.



Fig. 15. — Bardage sur chaussée de bois argileuse *(Photo J. P. Adam)*.

qu'il faudrait 825 de ces animaux pour assurer le transport d'une des pierres du trilithon sur une chaussée horizontale. Or il se trouve que, traditionnellement, on estime qu'un bœuf est capable de tirer une charge de 1.000 kg placée sur un char. Si l'on considère le bloc de 800.000 kg sur des rouleaux, on en déduit que 800 bœufs sont nécessaires à son déplacement et l'on rejoint par l'empirisme expérimental les chiffres donnés par la méthode analytique.

L'importance de ce troupeau constitue d'emblée un obstacle majeur à son utilisation ; non pas qu'il eût été impossible de réunir une telle quantité d'animaux mais leur nombre rendait tout à la fois, leur attelage et leur direction irréalisables.

D'autre part un handicap technique s'opposait paradoxalement à

Toutefois le rendement décroît avec la durée du travail, c'est ainsi qu'en travail continu de 8 h un cheval ne fournit plus que 40 kgm à la seconde et un bœuf 50 kgm à la seconde.



Fig. 16. — Transport sur traîneau et rouleaux. Letoon du Xanthe, Lycie *(Photo J. P. Adam)*.

l'utilisation des animaux de trait pour le transport des grosses charges [1]. L'Antiquité en effet, ignorait l'attelage des couples d'animaux en file. Comment s'y prenait-on en réalité pour relier un chariot aux animaux de trait ? Certes le joug était connu pour accoupler les bœufs, et dans le cas d'une charge normale, le timon était fixé directement sur le joug entre les deux animaux, mais lorsqu'il s'agissait d'un transport pesant, chaque couple de bœufs était relié à la charge par un câble de traction ou un timon, on avait alors une disposition en éventail extrêmement préjudiciable à l'efficacité du travail [2].

(1) En réalité on avait parfois recours à la traction animale multiple mais avec beaucoup de maladresse comme le montre le bas-relief de Tourah près de Memphis ou la description de Xénophon citée plus loin.

(2) Les principes des forces constantes en dynamique nous permettent de vérifier en effet que le travail d'une force (F) est égal au produit de son intensité (F) par la distance parcourue (d) par la charge et par le cosinus de l'angle (α)

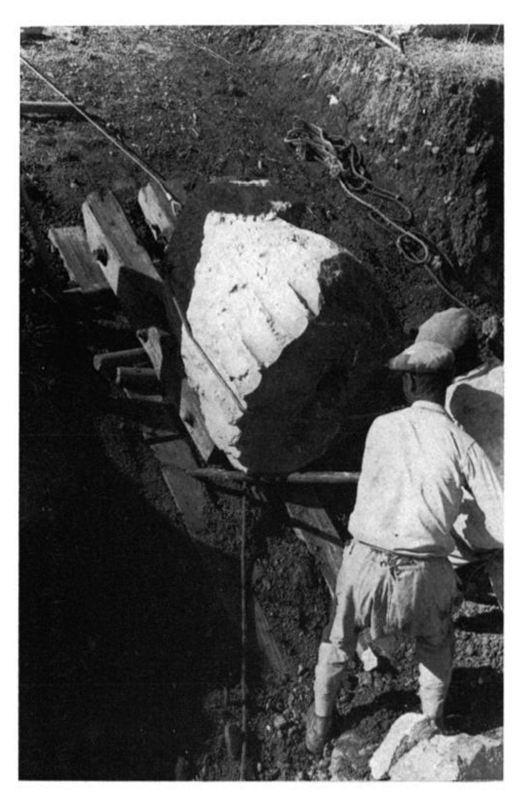


Fig. 17. — Transport sur traîneau et rouleaux avec chaussée de bois *(Photo J. P. Adam)*.

Xénophon nous apporte une confirmation sur l'emploi de ce type d'attelage dans la description qu'il nous donne du moyen employé par Cyrus pour assurer le déplacement de pesantes tours de combat hautes de 18 pieds [1]. Chaque tour munie de roues, était dotée de 8 timons auxquels étaient attelés 8 couples de bœufs tirant de front. Dans ces conditions, précise Xénophon, chaque paire de bœuf tirait une charge de 15 talents (1 talent = ±26 kg) soit 390 kg ce qui est très faible. La machine pesant un total de 120 talents (3.120 kg), dans un attelage en file, 3 bœufs auraient suffit à la remorquer ! [2]

La réussite du transport du monolithe de Carrare traîné par des

fait par la force (direction du câble de traction) avec la trajectoire. Ce qui s'exprime par la formule : $tF = (F.d.) \cos \alpha$. On comprend aisément qu'avec l'ouverture de l'angle le travail va décroître puisque le cosinus se rapproche de zéro.

(1) Xénophon, « La Cyropédie », Livre VI.

(2) Nous n'envisagerons pas l'utilisation du cheval, puisque sans le collier d'épaule, apparu au x^e siècle de notre ère, cet animal était réservé à la monte et aux chars légers.

bœufs, réside en fait dans deux particularités complémentaires : d'abord l'existence d'une déclivité permanente d'incidence optimum, ensuite le fait que les paires de bœufs tiraient en ligne sur 3 câbles seulement ; c'est pourquoi en dépit de l'apparente simplicité de cette source d'énergie, nous préférons nous tourner vers la traction humaine, avec laquelle la faiblesse musculaire est compensée par l'extrême élaboration technique du dispositif de démultiplication.

Dans l'hypothèse d'une traction assurée par des cabestans la durée du déplacement est un peu plus longue, puisque l'on démultiplie la distance parcourue par la charge, en faveur de la force et qu'il faut assurer la mise en place et l'ancrage des machines. L'avantage de ce procédé réside dans le nombre extrêmement réduit d'ouvriers nécessaires et dans la grande précision de la progression autorisant une mise en place rigoureuse des blocs les uns au-dessus et à côté des autres. Prenons un montage de cabestan utilisant des dimensions voisines de celles employées par le comte de Carbury pour ses machines, dimensions correspondant aux normes courantes en usage autrefois dans la marine, mais réduisons à six le nombre de barres. Chaque cabestan utilisant quatre hommes par barre on en comptera vingt-quatre au total. Un tel montage sera moins puissant, on s'en doute, que celui faisant appel à 32 hommes agissant sur 8 barres, mais en multipliant les cabestans on multipliera également les câbles ce qui entraînera une réduction des risques de rupture durant le parcours le plus long, risques plus considérables dans l'Antiquité compte tenu d'un tressage moins serré qu'au XVIII^e^ siècle et surtout d'un respect très relatif du coefficient de sécurité à la charge de rupture [(1)].

La force directement exercée par les 24 hommes du cabestan à six barres est, à raison de 20 kg par homme, de 480 kg. En prenant un centre d'application des forces à 1,70 m du centre de rotation et un rayon de tambour de 10 cm [(2)], cette force devient (formule du treuil) 8.160 kg. Quatre

(1) En raison de normes de sécurité sévères on fait actuellement travailler les cordes de chanvre au 1/10 de leur charge de rupture. Ainsi un câble de 3,5 cm de diamètre se rompant à 9.500 kg est utilisé pour un travail de 900 à 1000 kg, charge qui peut être doublée pour l'Antiquité.

(2) Il faut noter qu'afin d'assurer la cohésion des fibres et éviter l'éclatement du bois, on cercle les tambours de treuils et de cabestans avec des frettes métalliques.

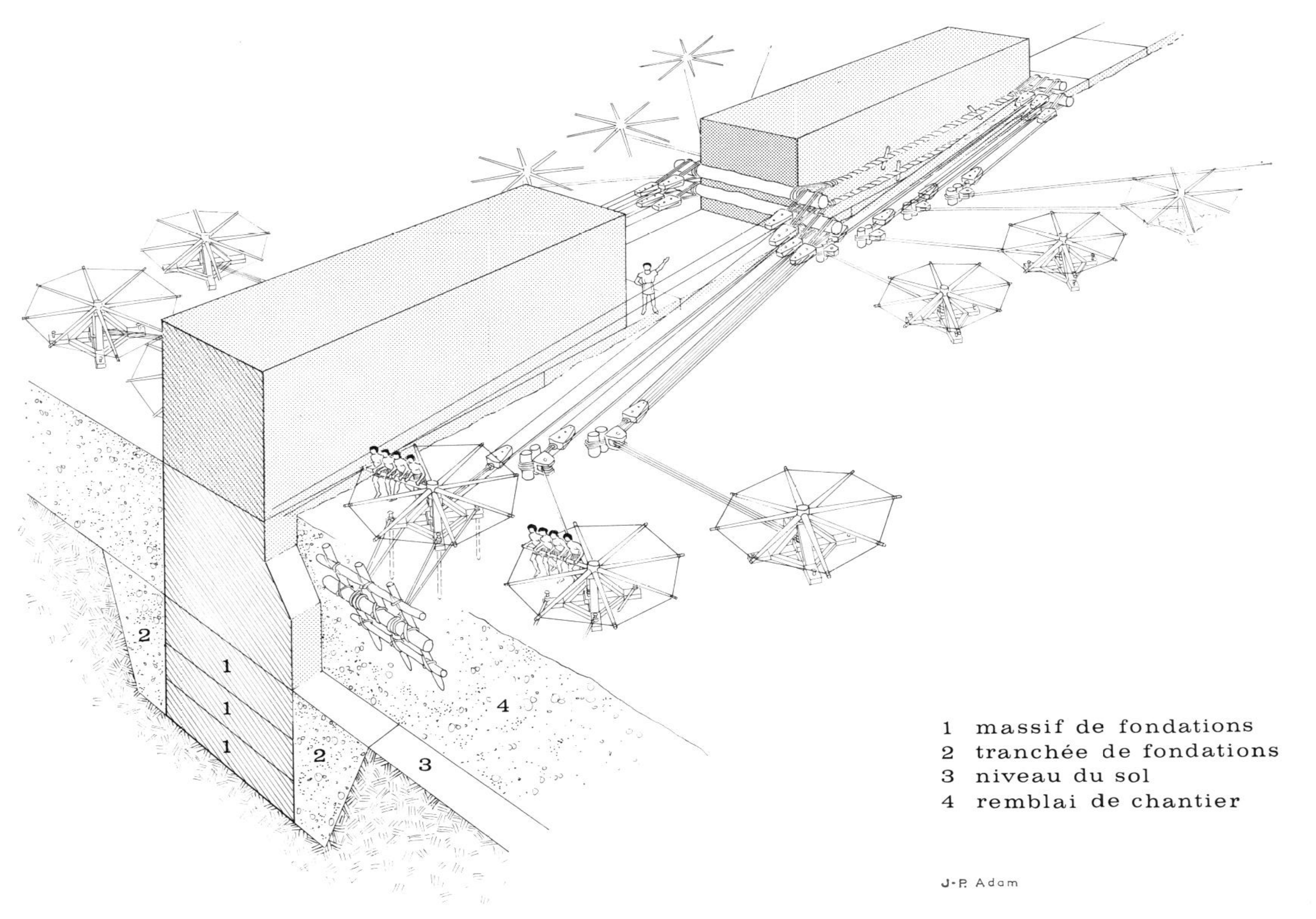


Fig. 18. — Trilithon de Baalbek. Phase finale du transport.

câbles de chanvre, assurant chacun quatre tonnes de traction, s'enroulent autour du tambour et agissent sur la charge chacun par l'intermédiaire d'un palan à deux poulies portant à 16.320 kg la puissance de la machine ; puissance réduite à 13.056 kg par le coefficient de frottement. Six de ces engins, faisant appel à 144 hommes et assurant une puissance de traction de 78.336 kg doivent permettre, avec une marge de puissance excédentaire toujours utile, le transport de chacun des blocs du trilithon. Nous avons vu que les conditions de ce transport dispensaient de tout déplacement dans le plan vertical puisque chaque pierre arrivait à son niveau de pose par le seul effet de la traction horizontale. Il n'en demeure pas moins que le calage de ces gigantesques éléments réclamait des dispositions particulières puisque leur mise en place fut effectuée avec une précision remarquable.

Cette phase finale va réclamer un effort plus considérable, donc plus de machines, car les charges transportées vont devoir abandonner leurs rondins avant d'arriver sur l'assise destinée à les recevoir; si cela n'était pas, il faudrait soulever le bloc afin de retirer les pièces de bois, ce qui poserait le problème du levage que l'on a voulu précisément éviter. Afin de réduire les frottements des pierres nues les unes sur les autres, la seule solution consiste à rendre savonneuse la face d'attente de l'assise inférieure à l'aide d'argile mouillée.

Compte tenu de la formidable pression la réduction du coefficient de frottement sera faible mais néanmoins influente ; la charge sera réduite au tiers de sa valeur initiale c'est-à-dire à 533 tonnes.

Il faut avoir recours alors à des cabestans de huit barres, manœuvrés par 32 hommes développant 640 kg (fig. 18). Transformée par le treuil cette force devient (même longueur de levier et même rayon que précédemment) 10.880 kg. En fin de compte il faudra 16 de ces machines, soit 512 hommes, développant une puissance de 556.896 kg, pour mettre en place avec sûreté chacune des trois pierres géantes [1]. Le guidage précis de la charge et les corrections de la trajectoire sont assurés par la disposition symétrique des cabestans sur lesquels on peut agir tantôt d'un côté, tantôt de l'autre.

[1] Notons que l'effort réel des 512 ouvriers est de 10,240 kg, soit, grâce à la démultiplication des machines, le $\frac{1}{78}$ de la charge.

Le montage représenté par la figure est destiné à répartir l'effort de traction sur des points d'attache placés à l'avant et à l'arrière de la charge, mais lorsque la pierre sera arrivée très près de la précédente, il conviendra de supprimer les attaches de l'avant et de reporter à l'arrière tous les câbles, de façon à permettre le serrage du joint. La même figure montre, pour l'un des cabestans le dispositif mis en œuvre pour fixer celui-ci solidement. Il est en effet essentiel d'assurer à la machine de traction une puissance d'inertie supérieure à celle exercée pour tirer la charge, faute de quoi c'est la machine qui se déplacerait. Le procédé illustré ici, consiste en une herse d'ancrage enterrée dans le massif de remblai sur lequel elle prend appui, cette méthode n'est précisément applicable que dans le cas où le sol est constitué artificiellement, il suffit alors de prévoir, avant le remblaiement complet, les emplacements de cabestans, afin de poser les herses dont seuls les câbles d'ancrage dépasseront du sol. Lorsque le sol est ferme et naturel, le creusement de fosses pour le logement des herses étant plus fastidieux, on utilise des pieux en série haubannés les unes aux autres. Enfin dans le cas d'un sol rocheux, il faut créer artificiellement par enrochement, une masse inerte plus pesante que la charge et sur laquelle on vient se fixer [1].

Les pierres étant juxtaposées sur leur assise, il est alors aisé, pour leur assurer un alignement rigoureux, de procéder à un ravalement collectif des faces de parement, lequel offre l'avantage de rattraper les légers décalages toujours possibles après l'opération de halage.

A la conclusion de cette brève étude nous pensons avoir ramené l'irritante question de la mise en place des mégalithes de Baalbek, à des dimensions saisissables, pour ne pas dire humaines.

L'argumentation proposée, si elle a fait appel à des formules mathématiques modernes, n'a eu recours à ces démonstrations que pour justifier le rendement et l'efficacité de machines et de procédés connus et élaborés empiriquement par les bâtisseurs de l'Antiquité.

Un problème archéologique demeure, qui consiste à déterminer par qui

[1] Au cours des opérations de bardages citées plus haut, l'auteur a pu expérimenter ces trois procédés d'ancrage et en vérifier l'efficacité.

et à quel moment, ces techniques, firent leur apparition. Sachant que les Égyptiens ignoraient la poulie [1] il n'est pas déraisonnable d'attribuer à un peuple de navigateurs, soit les Minoens soit les Phéniciens [2], l'invention de cet organe essentiel de toutes les machines à câbles et du palan, puis de toutes les machines de levage et de halage exploitant ce type de mécanisme. On peut penser qu'un jour l'archéologie sous-marine apportera une réponse satisfaisante à ce point de détail, dont on ne saurait mésestimer l'importance.

Jean-Pierre ADAM.

(1) De nombreuses représentations et maquettes de navire nous ont appris que les cordages de la voilure glissaient sur des potences formant saillie de part et d'autre du mât, ou dans des simples gorges (cf. bas-reliefs de l'expédition navale d'Atshepsout à Deir-el-Bahari et maquette du tombeau de Toutankhamon).

(2) Les navires phéniciens représentés sur les peintures de la tombe de Drah Abou'l Neggah sont gréés à l'égyptienne, sans poulies.